

УДК 629.429.3:621.313

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.141384

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З КОМБІНОВАНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Костенко І. О.

Об'єктом дослідження є процес виникнення електромагнітного моменту у тягових двигунах комбінованого збудження тролейбусу при одночасному включенні обох складових системи збудження. Цей процес формально представлено у вигляді механічних характеристик – залежності електромагнітного моменту двигуна від струмів збудження.

Одним з найбільш проблемних місць є визначення впливу струмів збудження послідовної та незалежної обмотки на електромагнітний момент двигуна у вигляді неперервної залежності, яка дозволяє створити систему управління тяговим приводом з DC-DC перетворювачем збудження. А також враховує особливості магнітної системи двигуна.

В ході дослідження використовувався метод кінцевих елементів в плоско-паралельній постановці задачі обчислення моментів за результатами розрахунку магнітного поля та наступним регресійним аналізом результатів цифрових експериментів за допомогою поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок.

Отримано неперервна залежність електромагнітного моменту від струмів збудження у вигляді поліному, який можливо використовувати як при створенні систем керування DC-DC перетворювачем збудження, так і при моделюванні режимів роботи тягового приводу в цілому. Це пов'язано з тим, що запропонований вид поліному має неперервний вигляд залежності та її похідних при усіх можливих значеннях струмів при роботі приводу. За результатами регресійного аналізу максимальне відхилення розрахованих залежностей не перевищує 0,052, а середньоквадратичне відхилення не більш 0,041. Це підтверджує адекватність отриманих залежностей результатам цифрового експерименту по визначенню електромагнітного моменту.

Завдяки цьому забезпечується можливість моделювання режимів роботи тягового приводу на основі двигуна з комбінованим збудженням та DC-DC перетворювачем. Отримані за результатами моделювання параметри системи керування дозволять підвищити енергетичні характеристики тролейбусів. У порівнянні з аналогічними відомими системами це забезпечує більш раціональне використання електричної енергії на тягу електрорухомого складу.

**Ключові слова:** механічні характеристики, тяговий привод, комбіноване збудження, метод кінцевих елементів.

## **1. Вступ**

Розвиток сучасної інфраструктури міст України неможливо уявити без створення енергоефективного міського електротранспорту, складовою частиною якого є тролейбусні маршрути. Основною частиною, що обумовлює енергоефективність тролейбуса є тяговий електропривод [1]. Безконтактні тягові приводи на основі асинхронних тягових двигунів, які відрізняються підвищеною надійністю, широко розповсюджені у сучасних тролейбусах. Однак на теренах України проходить постійну модернізацію широко розповсюджений тяговий привод на основі тягових двигунів постійного струму з комбінованим збудженням [2].

Тому актуальним є дослідження напрямків підвищення ефективності тягових приводів тролейбусів. Одним з таких напрямків є створення тягового приводу на основі двигуна з комбінованим збудженням і DC-DC перетворювача для живлення обмотки незалежного збудження.

## **2. Об'єкт дослідження та його технічний аудит**

Об'єктом дослідження є процес виникнення електромагнітного моменту у тягових двигунах комбінованого збудження тролейбуса при одночасному включенні обох складових системи збудження. Цей процес формально представлено у вигляді механічних характеристик – залежності електромагнітного моменту двигуна від струмів збудження.

Одним з найбільш проблемних місць є визначення впливу струмів збудження послідовної та незалежної обмотки на електромагнітний момент двигуна у вигляді неперервної залежності, яка дозволяє створити систему управління тяговим приводом з DC-DC перетворювачем збудження. А також враховує особливості магнітної системи двигуна.

## **3. Мета та задачі дослідження**

Мета роботи – створення методики розрахунку механічних характеристик тягового двигуна з комбінованим збудженням на основі методу кінцевих елементів.

Для вирішення мети поставлені наступні задачі дослідження:

1. Зробити розрахунок магнітного поля тягового двигуна комбінованого збудження у двовірній постановці завдання.
2. Провести комплекс цифрових експериментів по визначенню залежностей електромагнітного моменту від струмів у обмотках двигуна.
3. Встановити неперервну залежність електромагнітного моменту за результатами регресійного аналізу.

## **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Серед основних напрямків вирішення проблеми підвищення ефективності є використання DC-DC перетворювача для живлення обмотки незалежного збудження [3], але в цій роботі не розглянуто використання перетворювача для тягового приводу саме тролейбуса. Автори зосередили увагу на автономному електротранспорті.

Робота [1] присвячена основним напрямкам підвищення ефективності тягових двигунів електротранспорту, проте в неї дуже незначна увага приділена саме тяговим двигунам з комбінованим збудженням.

Автори роботи [2] зазначають перспективність використання тягових двигунів постійного струму при модернізації тягового приводу саме міського електротранспорту, однак найбільшу увагу вони приділили колекторному вузлу.

Альтернативний варіант вирішення проблеми, викладений в роботі [4], де автори зосередилися на можливості застосування для тяги обмотки незалежного живлення з DC-DC перетворювачем. Однак автори роботи [5] пропонують більш раціональний підхід – використання комбінованого збудження, що дає можливість значно знизити потужність та втрати у DC-DC перетворювачі. У роботі [6] автори наводять вдосконалений спосіб регулювання режимів роботи двигуна комбінованого збудження, але для встановлення параметрів систем управління авторами роботи не розглянуто. Для визначення цих параметрів необхідно визначення магнітних характеристик двигуна, яким присвячена робота [7] та механічних характеристик [2]. Однак важливим недоліком методики [7] є відсутність врахування взаємного впливу полів обмоток та локального насичення елементів магнітопроводу двигуна. Для її рішення автор дисертації [8] для комбінованого збудження зварювальних генераторів пропонує використати метод кінцевих елементів у двомірній постановці задачі. В [9] розглянуто сучасний програмний комплекс FEMM (Finite Element Method Magnetics) для проведення кінцево-елементного аналізу з використанням спеціалізованого мови LUA [10] на прикладі вирішення задачі для індукторного двигуна. Значним недоліком такого підходу є дискретний вигляд механічної характеристики електричної машини. Для отримання неперервної залежності електромагнітного моменту від струмів автор роботи [11] запропонував апроксимувати її поліномами, найбільш прийнятний вид яких наведено у роботі [12]. В роботі [13] запропоновано використати для регресійного аналізу поліноми Чебишева на множині рівновіддалених точок.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що:

- для вирішення поставленої мети необхідно використовувати метод кінцевих елементів для розрахунку магнітного поля;
- обчислення електромагнітних моментів необхідно проводити за результатами розрахунку магнітного поля;
- регресійний аналіз результатів цифрових експериментів необхідно проводити за допомогою поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок.

## **5. Методи досліджень**

Основні положення методу кінцевих елементів. Для стаціонарного магнітного поля метод кінцевих елементів двомірної розрахункової моделі і прямокутної системи координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала [5, 6, 10]:

$$F = \int_S \left( \int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) dS - \int_S \vec{A} \cdot \vec{\delta} dS,$$

де  $S$  – область розрахунку магнітного поля;  $B_x, B_y$  – складові вектора магнітної індукції за напрямками прямокутної системи координат  $x$  та  $y$ ;  $\mu$  – магнітна проникність;  $\vec{\delta}$  – щільність струму;  $\vec{A}$  – векторний магнітний потенціал, який визначається співвідношенням:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}.$$

Для прямокутної системи координат, прийнятої для розрахунків, що становлять вектора магнітної індукції, визначаються за формулами, виведеним з рішення рівняння:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}.$$

*Розрахунок магнітного поля двигуна.* Для подальших досліджень у якості базової конструкції обрано тяговий двигун ЕД 139А виробництва Державного підприємства «Завод «Електроважмаш» (Україна), основні параметри якого приведено у табл. 1.

**Таблиця 1**

Основні технічні характеристики тягового двигуна ЕД 139А

Параметр	Величина
Номинальна напруга	550 В
Номинальний струм якоря	280 А
Номинальна частота обертання	1650 об/хв
ККД у номінальному режимі	91 %
Момент на валу у номінальному режимі	810 Нм
Число полюсів	4
Число пазів	45
Внутрішній діаметр якоря	79 мм
Зовнішній діаметр якоря	294 мм
Повітряний зазор під головний полюсом	2/3,5 мм
Тип обмотки якоря	волнова

Для вирішення поставленого завдання використовувався програмний комплекс FEMM (Finite Element Method Magnetics), що включає в себе:

- предпроцесор дозволяє задавати граничні умови, властивості матеріалів розрахункових областей і програму тріангуляції;
- програму розрахунку магнітного поля, яка становить і вирішує систему нелінійних рівнянь методом Ньютона-Рафсона;

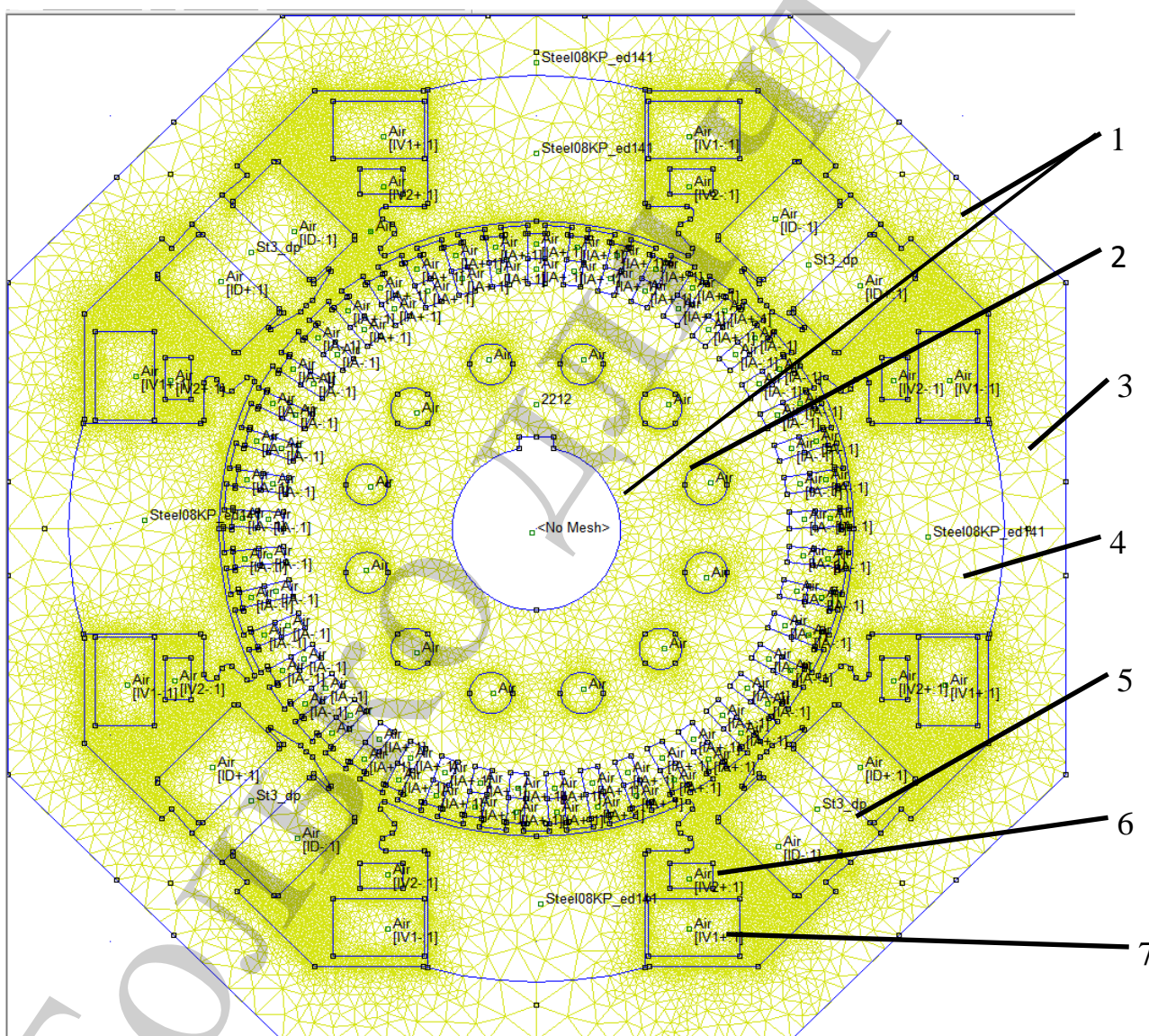


– постпроцесор дозволяє відображати розрахункову картину магнітного поля, а також проводить наступні розрахунки:

- ✓ поверхневих інтегралів різного виду;
- ✓ інтегралів по заданому контуру;
- ✓ визначення магнітного потоку, який проходить через заданий контур;
- ✓ визначення значення напруженостей, індукції магнітного поля та магнітних проникностей в заданих точках.

## 6. Результати досліджень

На рис. 1. показана область розрахунку, розбита на кінцеві трикутні елементи.

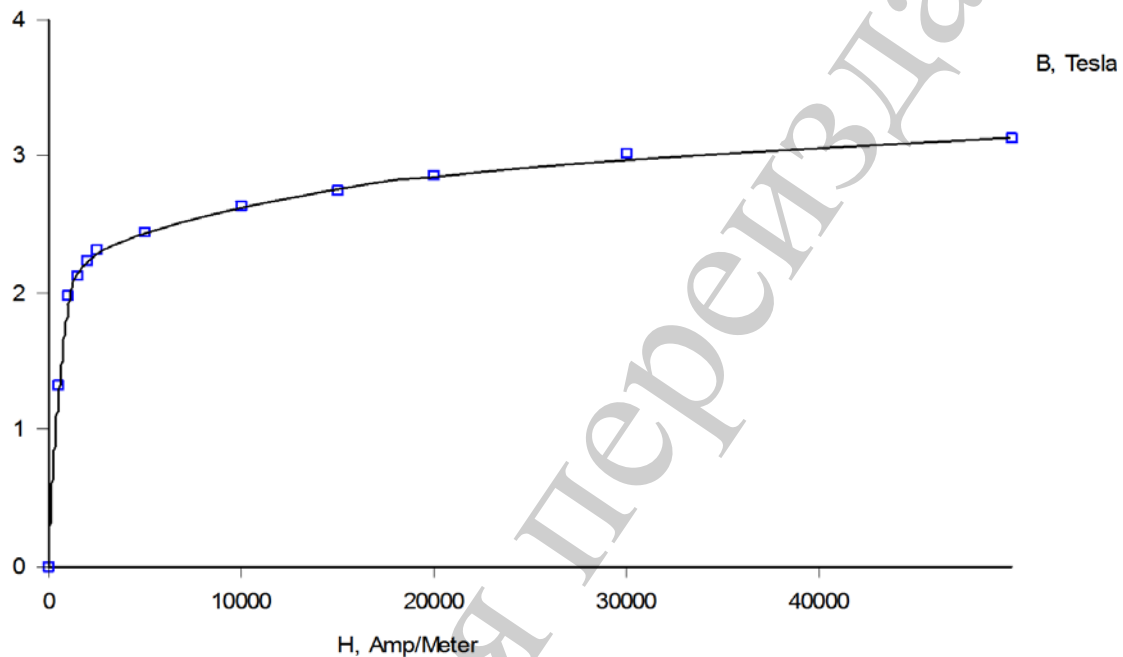


**Рис. 1.** Розрахункова область у поперечному перетині тягового двигуна ЕД 139 А: 1 – границі встановлення граничних умов 1-го роду, 2 – якір, 3 – станина, 4 – головний полюс, 5 – додатковий полюс, 6 – послідовна обмотка збудження, 7 – незалежна обмотка збудження

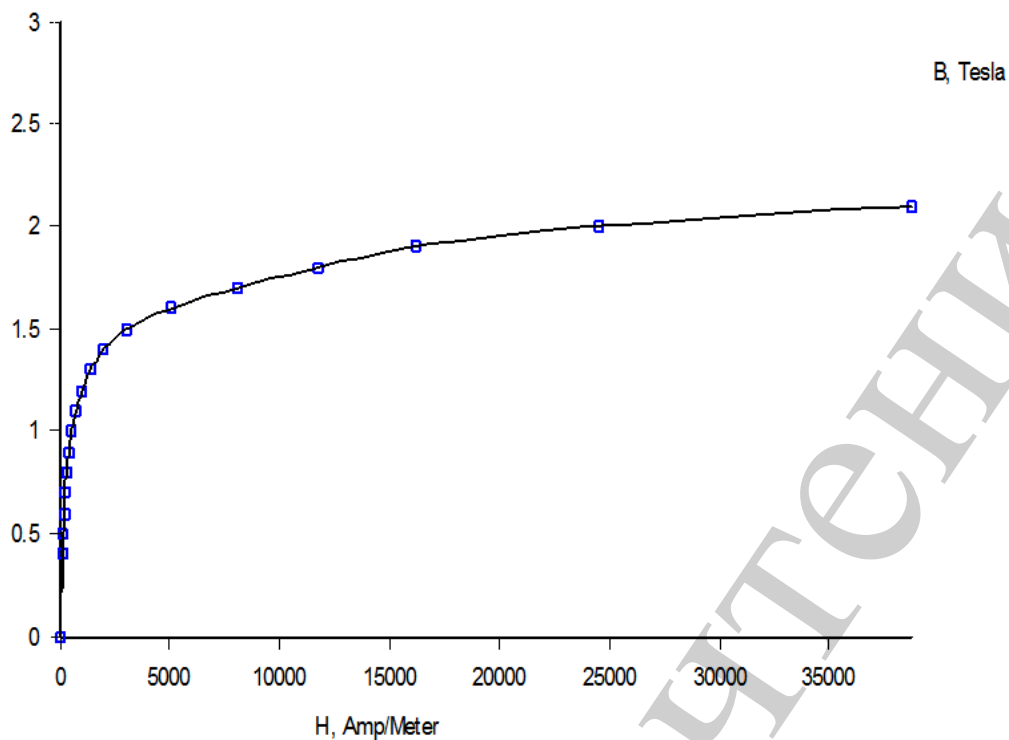
З огляду на те, що комбінована система збудження у режимі навантаження має лише центральну симетрію, то розрахунок буде проводитися на всьому поперечному перерізі машини.

На границя 1 (рис. 1) приймаємо граничну умову  $A=0$  з огляду на прийняття припущень про те, що магнітний потік поза розглянутої області дорівнює нулю.

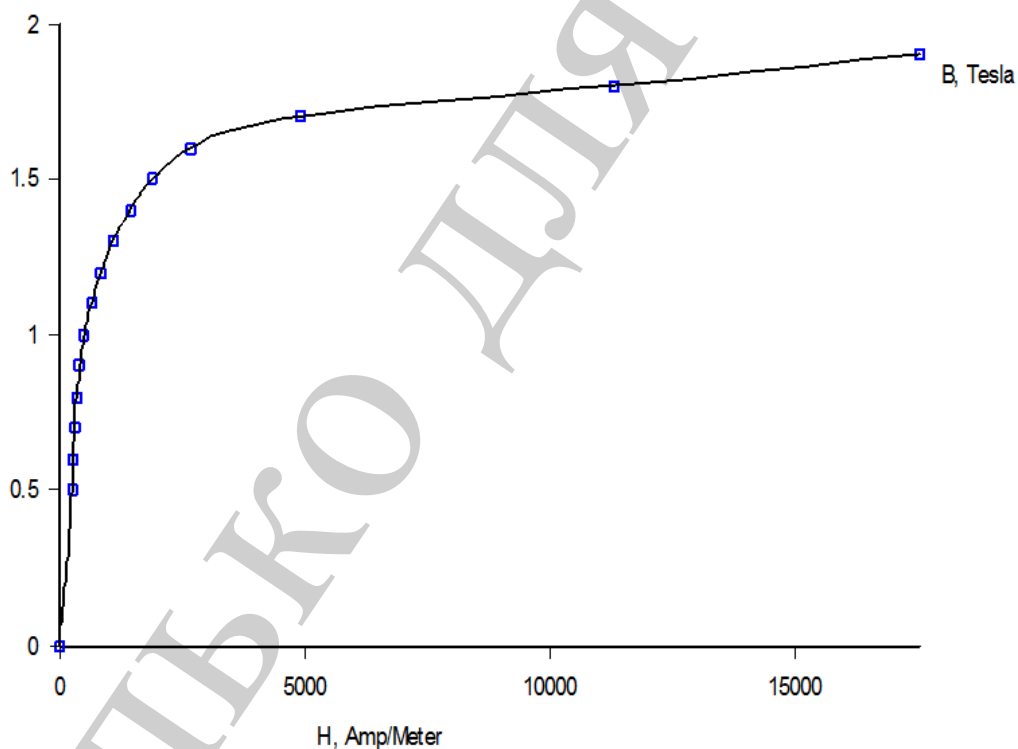
Для нелінійних ділянок розрахункових області, які виконані зі сталей, введені криві намагнічення, які апроксимовані кусочно-лінійними функціями. Криві намагнічення наведені на рис. 2–4.



**Рис. 2.** Крива намагнічення сталі 08Кп станини та головних полюсів



**Рис. 3.** Крива намагнічення сталі Ст3 додаткових полюсів



**Рис. 4.** Крива намагнічення сталі 2212 осердя якоря

Згідно методу кінцевих елементів розрахункова область розбита на кінцеві елементи. Щільність сітки більша для повітряних зазорів та між полюсних зон, в яких зосереджено основне напруження магнітного поля та поля розсіювання обмоток збудження.

Для встановлення струмів якоря в області зі струмами (обмоток збудження, додаткових полюсів та якоря) встановлюються магніторухливі сили цих областей з урахуванням кількостей витків [8–10].

Для зручності ідентифікації режимів роботи двигуна введемо відносні коефіцієнти, що ідентифікують режими роботи двигуна:

- коефіцієнт струму якоря:

$$k_a = \frac{I_a}{I_{an}},$$

де  $I_a$ ,  $I_{an}$  – струми якоря у розрахунковому та номінальному режимах;

- коефіцієнт струму основної (послідовної) обмотки збудження:

$$k_{v1} = \frac{I_{v1}}{I_{an}},$$

де  $I_{v1}$  – струми послідовної обмотки у розрахунковому режимі, цей коефіцієнт дорівнює коефіцієнту ослаблення струму;

- коефіцієнт струму незалежної обмотки збудження:

$$k_{v2} = \frac{I_{v2}}{I_{v2n}},$$

де  $I_{v2}$ ,  $I_{v2n}$  – струми незалежної обмотки збудження у розрахунковому та номінальному режимах.

Струм обмотки додаткових полюсів встановлюється пропорційно струму якоря в усіх розрахункових режимах.

За результатами розрахунків магнітного поля отримані картини магнітного поля у різних режимах:

- номінальний режим ( $k_a=1$ ,  $k_{v1}=1$ ,  $k_{v2}=0$ ) наведено на рис. 5;
- режим навантаження без ослаблення поля ( $k_a=1$ ,  $k_{v1}=0,5$ ,  $k_{v2}=0$ ) наведено на рис. 6;
- режим навантаження при підмагніченні основної обмотки збудження ( $k_a=1$ ,  $k_{v1}=0,5$ ,  $k_{v2}=1$ ) наведено на рис. 7 та інші.



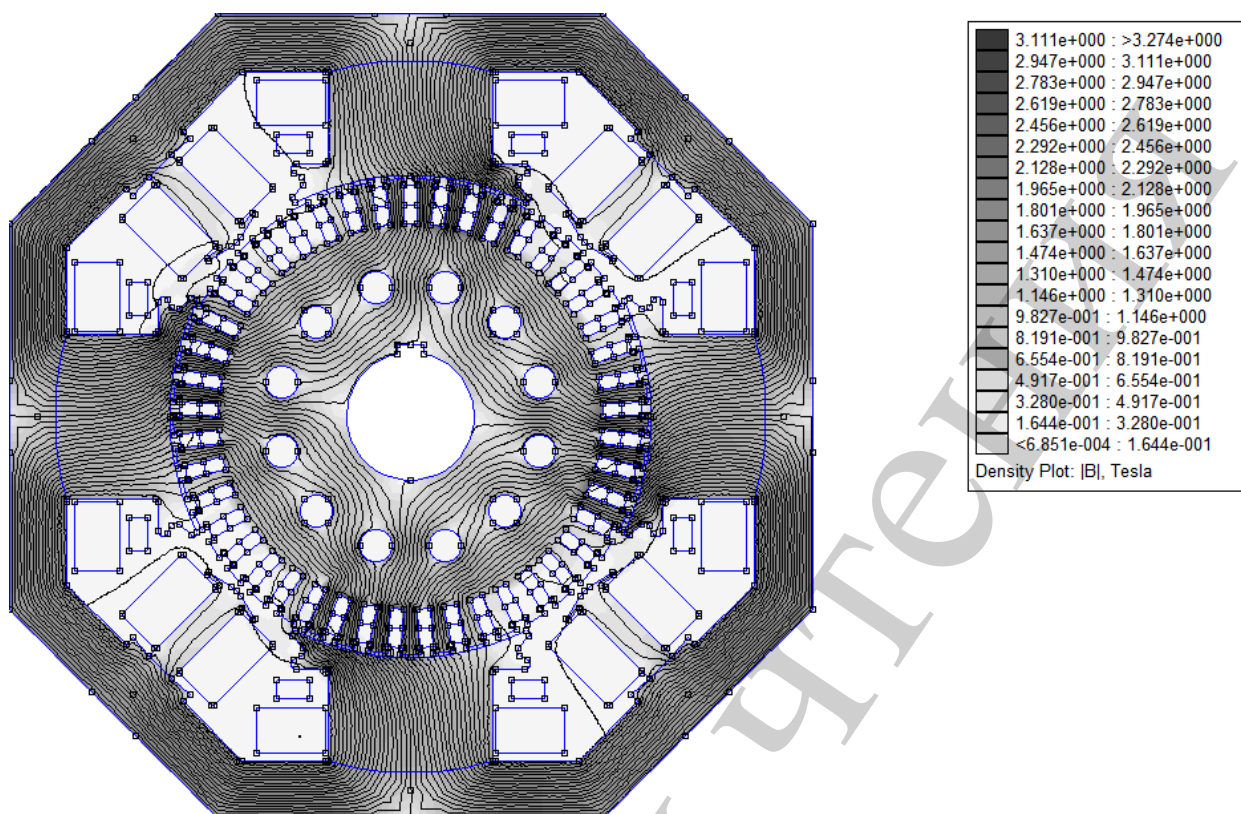


Рис. 5. Магнітне поле у режимі:  $k_a=1$ ,  $k_{v1}=1$ ,  $k_{v2}=0$

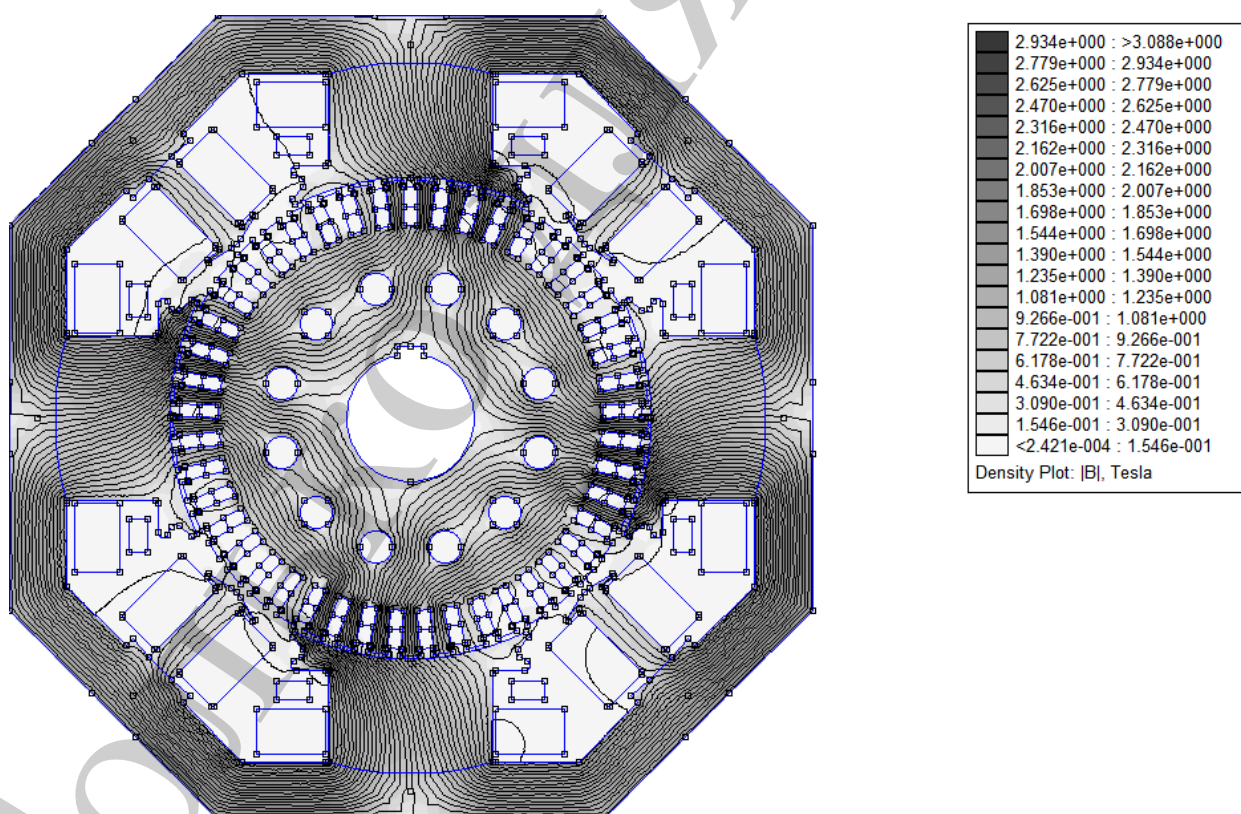
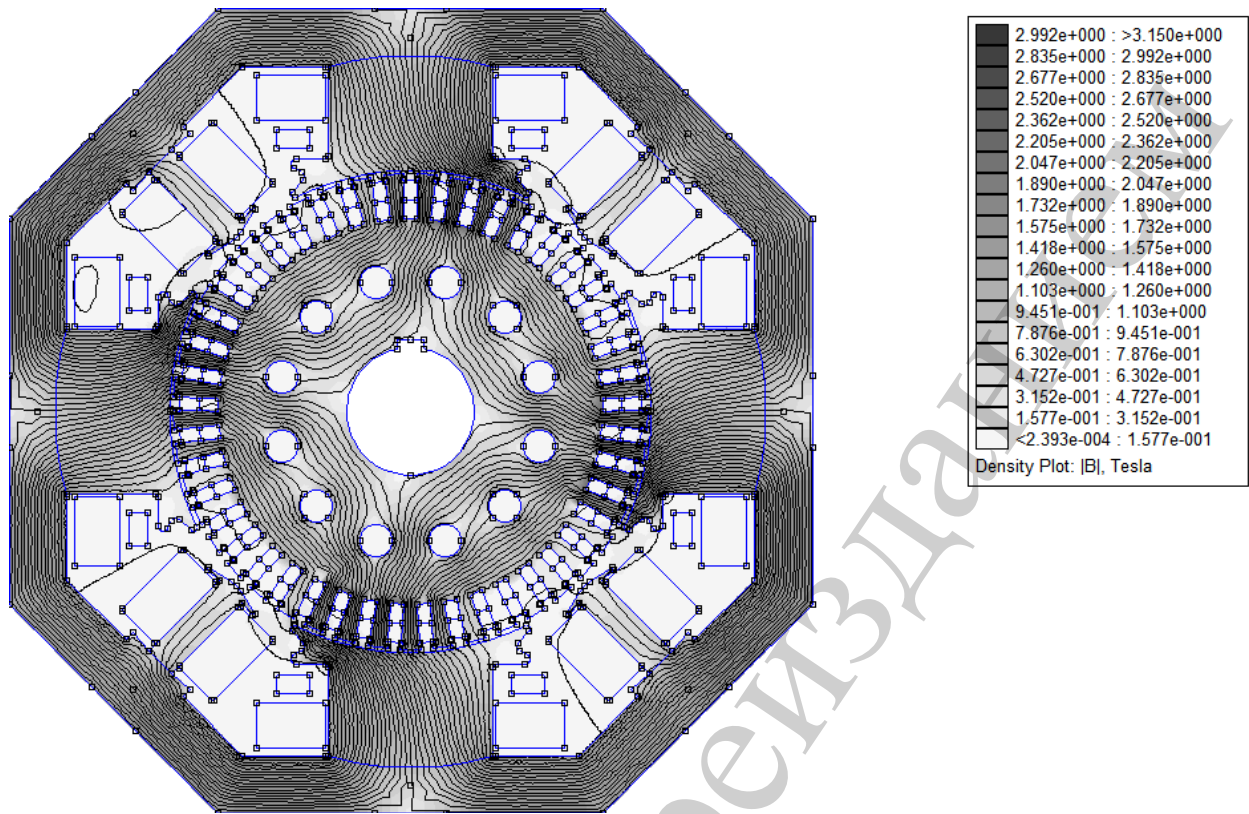


Рис. 6. Магнітне поле у режимі:  $k_a=1$ ,  $k_{v1}=0,5$ ,  $k_{v2}=0$



**Рис. 7.** Магнітне поле у режимі:  $k_a=1$ ,  $k_{v1}=0,5$ ,  $k_{v2}=1$

Як видно з рис. 5-7 характер магнітного поля близький один до одного. Спостерігається незначне розмагнічення магнітної системи двигуна, що обумовлено дією поперечного потоку реакції якоря. Картини магнітного поля показують досить значне і нерівномірне насичення елементів магнітопроводу. Такі процеси обумовлюють нелінійність магнітних характеристик двигуна та їх залежність від обох струмів збудження.

За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів знаходимо величину електромагнітного моменту. Інтегрування по поверхні замінюється інтегруванням по контуру навколишнього ротора. Вираз для визначення електромагнітного моменту для такого завдання перетвориться до виду:

$$\vec{M} = \frac{1}{2} l_r \int_{l_r} \left( \left( \vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) + \vec{B} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{n}) \right) \cdot \vec{r} \right) dr,,$$

де  $l_r$  - контур інтегрування – коло з центром, що збігається з центром валу ротора і діаметром рівним зовнішньому діаметру ротора плюс довжина повітряного зазору.

Замінивши операції інтегрування підсумовуванням, отримаємо розрахунковий вираз:

$$\vec{M} = \frac{1}{2} l_r \sum_{l_r} \left( \left( \vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) + \vec{B} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{n}) \right) \cdot \vec{r} \right).$$

Таким чином, вирази являють собою електромагнітний момент як функцію трьох змінних:

- коефіцієнт струму якоря;
- коефіцієнт струму основної (послідовної) обмотки збудження;
- коефіцієнт струму незалежної обмотки збудження ( $k_a$ ,  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$ ), які можуть бути визначені шляхом розрахунку магнітного поля машини.

Для ідентифікації залежностей електромагнітного моменту проведемо комплекс цифрових експериментів по їх розрахунку за результатами розрахунку магнітного поля двигуна у середовище FEMM [9]. Для автоматизації процесів розроблено макрос на мові LUA [9].

Аналогічно з струмами для зручності ідентифікації режимів роботи двигуна введемо відносні значення електромагнітного моменту:

$$M_d^* = \frac{M_d}{M_{dn}},$$

де  $M_d$ ,  $M_{dn}$  – електромагнітний момент у розрахунковому та номінальному режимах.

Результати цифрових експериментів представляють дискретний простір, що не дає можливості використання цієї моделі для досліджень робочих властивостей тягового приводу взагалі.

Регресійний аналіз залежності електромагнітного моменту від коефіцієнтів струмів двигуна. Для створення неперервної математичної моделі механічних характеристик тягового двигуна ЕД 139 А проведемо регресійний аналіз за методиками наведеними та апробованими в [2, 11, 12, 13] на основі методу поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок.

При цьому апроксимація електромагнітного моменту у відносних величинах має вигляд:

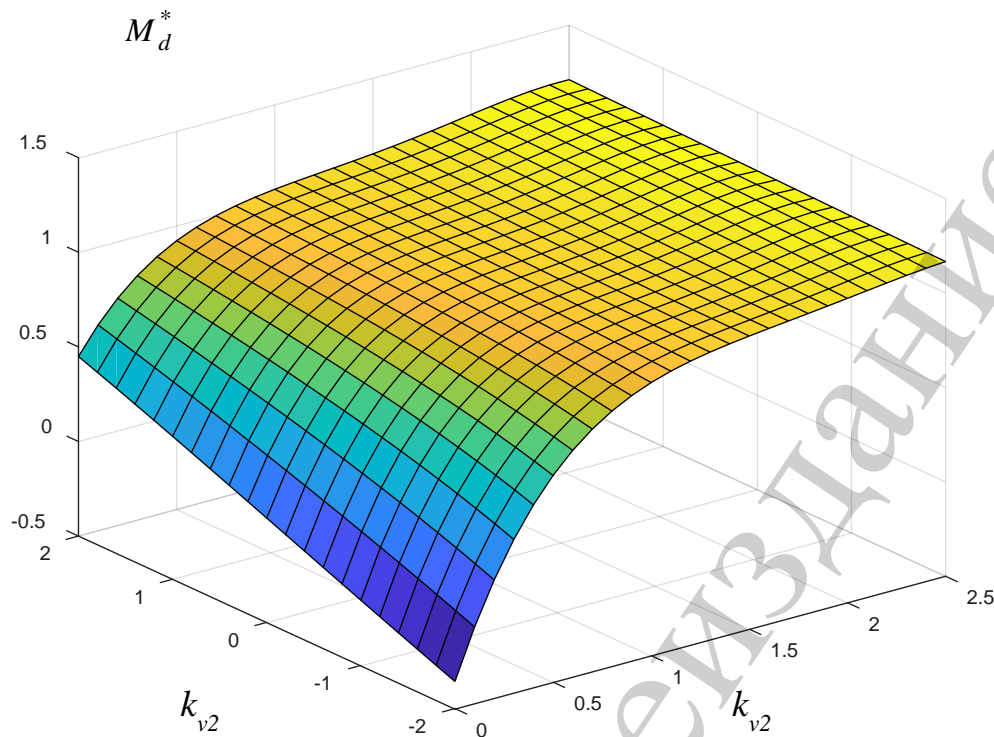
$$M_d^* = \sum_{i=0}^{I_{fm}} \sum_{j=0}^{J_{fm}} \sum_{k=0}^{K_{fm}} \left( m_{ijk} \cdot (M_a \cdot k_a + Z_a)^i (M_{v1} \cdot k_{v1} + Z_{v1})^j \cdot (M_{v2} \cdot k_{v2} + Z_{v2})^k \right), \quad (1)$$

де  $m_{ijk}$  – коефіцієнт регресії полінома, апроксимуючого електромагнітний момент;

$I_{fm}$ ,  $J_{fm}$ ,  $K_{fm}$  – ступені апроксимуючого полінома електромагнітного моменту за коефіцієнтами струмів якоря та збуджень – відповідно.

За результатами регресійного аналізу максимальне відхилення розрахованих залежностей не перевищує 0,052, а середньоквадратичне відхилення не більш 0,041.

На рис. 8 наведено залежність моменту двигуна від коефіцієнтів струмів якоря та збудження незалежної обмотки без ослаблення струму.



**Рис. 8.** Залежність  $M_d^* = f(k_{v2}, k_{vl})$  у режимі навантаження

Як видно з графіка на рис. 8, включення незалежної обмотки дає можливість регулювання моменту у широкому діапазоні частот обертання.

Таким чином, вираз (1) представляє математичну модель механічних характеристик двигуна у неперервному вигляді.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Запропонована методика визначення механічної характеристики дає можливість отримати неперервну залежність механічної характеристики, яка описує досить складний нелінійний об'єкт, – процес виникнення електромагнітного моменту у тягових двигунах комбінованого збудження тролейбусу при одночасному включенні обох складових системи збудження. Отримані за допомогою цієї залежності параметри системи керування тягового приводу тролейбусу дозволяють підвищити його ККД у тягових та тормозних режимах роботи.

*Weaknesses.* Запропонована методика супроводжується значними затратами розрахункового часу. При застосуванні сучасного комп'ютера на основі процесора Intel Core I7 3770 він складає 243 хв. Однак цей час повністю компенсується за рахунок підвищення ККД тягового приводу тролейбусу при експлуатації.

*Opportunities.* Перспективою подальших досліджень є визначення неперервних магнітних характеристик двигуна (залежність магнітних потоків у елементах конструкції від струмів у обмотках). А також розробка системи



керування DC-DC перетворювачем збудження, який враховує створені за визначеними механічні та магнітні характеристики тягового двигуна.

Створена методика є універсальним інструментом досліджень для тягових двигунів з комбінованим збудженням різних виробників – не тільки в Україні, але й за кордоном. Вона може бути використана, як для любых типів електричного транспорту – як міського, так і магістрального.

*Threats.* Підприємство, яке буде впроваджувати запропоновану методику понесе додаткові затрати на використання сучасного комп'ютерного обладнання для її отримання. Використаний програмний продукт FEMM [9] є вільним програмним забезпеченням. Наявність оригінальної програми, написаної на мові LUA [10] дає можливість досліджувати різні за параметрами тягові приводи.

## 8. Висновки

1. Виконані розрахунки магнітного поля тягового двигуна комбінованого збудження ЕД 139А. Їх особливістю є врахування нелінійності елементів конструкції двигуна. Задача вирішена у двовірній плоско паралельній постановці.

2. Проведено комплекс цифрових експериментів по визначенню залежності електромагнітного моменту двигуна від струмів збудження, результати якого наведено на рис. 8. З графіка на рис. 8 видно, що включення незалежної обмотки дає можливість регулювання моменту у широкому діапазоні частот обертання. Для проведення експериментів було розроблено програму на мові LUA, що автоматизує процес дослідження.

3. Для встановлення безперервної залежності електромагнітного моменту від струмів було проведено регресійний аналіз результатів цифрового експерименту. Запропоновано вид апроксимуючого поліному. За результатами регресійного аналізу встановлено, що максимальне відхилення розрахованих залежностей не перевищує 0,052, а середньоквадратичне відхилення не більш 0,041.

## Література

1. Liubarskyi B. H. Teoretychni osnovy dlia vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnoho peretvorennia enerhii elektrorukhomoho skladu: dys. ... d-ra tekhn. nauk. Kharkiv: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut», 2014. 368 p.
2. Pavlenko T., Shavkun V., Petrenko A. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 8 (89). P. 22–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112109>
3. Pan L., Zhang C. An Integrated Multifunctional Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Electric Vehicles Applications // Energies. 2016. Vol. 9, Issue 7. P. 493. doi: <https://doi.org/10.3390/en9070493>
4. Brazis V., Kroics K., Grigans L. Scientific Laboratory Platform for Testing the Electric Vehicle Equipped with DC Drive // Latvian Journal of Physics



and Technical Sciences. 2014. Vol. 51, Issue 5. P. 56–64. doi: <https://doi.org/10.2478/lpts-2014-0030>

5. Sposib oslablennia polia tiahovoho elektrodvyhuna zmishanoho zbudzhennia: Pat. No. 60109 UA. MPK (2006.01) N02R 7/06 / Kharchenko V. F. et. al.; zaiavnyk ta pravovlasnyk KhNAMH. No. u201013973; declared: 23.11.2010; published: 10.06.2011, Bul. No. 11.

6. Andriychenko V. P., Zakurdai S. O., Kostenko I. O. Improvement of the method used for control of starting direkt-current railway motor // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. Vol. 1, Issue 8 (67). P. 32–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.20123>

7. Ravino V. V., Sacukevich V. N., Galyamov P. M. Approksimaciya krivoy namagnichivaniya tyagovyh elektrodvigately trolleybusov // Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. 2007. Issue 1. P. 27–33.

8. Lyubarskiy B. G. Modelirovanie i razrabotka kombinirovannogo vozbudzheniya svarochnyh generatorov postoyannogo toka s cel'yu uluchsheniya ih tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley: diss. ... kand. tekhn. nauk. Kharkiv, 2000. 170 p.

9. Finite Element Method Magnetics: HomePage. URL: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>

10. Meeker D. Series-wound heteropolar inductor motor for automotive applications // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/itec.2016.7520203>

11. Ryabov E. S. Bezreduktorniy tyagoviy privod na osnove reaktivnogo induktornogo dvigatelya s aksial'nym magnitnym potokom dlya skorostnogo elektropodvizhnogo sostava: diss. ... kand. tekhn. nauk. Kharkiv, 2011. 162 p.

12. Modelyrovanye tiahovoho bezreduktornoho pryvoda na osnove ynduktornoho dvyhatelia s aksyalnym mahnytnym potokom / Riabov E. S. et. al. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". 2010. Issue 57. P. 243–251.

13. Lyubarskiy B. G., Yakunin D. I. Imitacionnoe modelirovanie mekhanizma naklona kuzova s lineynym elektromekhanicheskim preobrazovatelem // MATLAB: materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii. Kharkiv: BET, 2011. P. 425–436.